

# IEEE 802.11p WAVE 통신 시스템의 PER 성능 향상을 위한 채널 상관값 기반 시간축 보간 채널 추정 기법

임성묵\*, 고균병<sup>o</sup>

## Channel Correlation-Based Time Interpolation Channel Estimation Scheme to Enhance PER Performance in IEEE 802.11p WAVE Communication Systems

Sungmook Lim\*, Kyunbyoung Ko<sup>o</sup>

요약

본 논문에서는 IEEE 802.11p WAVE (Wireless Access for Vehicular Environments) 통신 시스템에서 PER (packet error rate) 및 BER (bit error rate) 성능 향상을 위해 이전 채널과의 상관값 기반의 신뢰도 테스트와 시간축 보간 기법을 적용한 새로운 채널 추정 기법을 제안한다. 제안 기법에서는 각 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 심볼마다 추정된 채널값과 이전 채널값의 상관값을 계산하여 특정 임계값보다 높은 경우에만 신뢰도가 높다고 판단하고, 현재 채널값으로 업데이트한다. 그 외 채널값은 각각 시간축 및 주파수축 보간 기법을 통해 두 개의 채널값을 재추정한 뒤 다시 이전 채널값과 상관값이 높은 채널값으로 최종 업데이트한다. 제안 기법은 디매핑 오차를 완화시키고 신뢰도 테스트의 정확도를 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 비어있는 채널 보간에 사용되는 신뢰도 높은 채널값의 수가 많아지게 되어 채널 추정 정확도 및 PER 성능을 향상시킬 수 있다.

**Key Words** : Wave, Channel Estimation, Correlation-based Reliability Test, Interpolation, Packet Error Rate

### ABSTRACT

In this paper, we propose a new channel estimation scheme which performs the reliability test based on the correlation with the previous and estimated channel values and the time domain interpolation technique in order to improve PER (packet error rate) and BER (bit error rate) in IEEE 802.11p WAVE (Wireless Access for Vehicular Environments) systems. In the proposed scheme, the correlation between the previous and estimated channel values is calculated and then the estimated channel value is updated only if the correlation is bigger than the predefined threshold per every OFDM (orthogonal frequency division multiplexing). Otherwise, the channel value is re-estimated through time-domain and frequency-domain interpolation, respectively, and the final channel value is updated through the correlation between the estimated and the previous channel values. The proposed method can reduce the demapping error and improve the accuracy of the reliability test. In addition, it can improve channel estimation accuracy and PER performance by time-based interpolation.

\* 본 연구는 2019년도 정부(경찰청)의 재원으로 도로교통공단의 지원을 받아 수행된 연구임.(No.POLICE-L-00001-01-101, 자율주행차의 도로주행을 위한 운행체계 및 교통인프라 연구개발)

※ 본 연구는 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.(No. NRF-2018R1D1A3B07049913)

※ 이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2017R1A2B4012883).

• First Author : Korea National University of Transportation, Electronic Engineering, smlim@ut.ac.kr, 부교수, 정회원

◦ Corresponding Author : Korea National University of Transportation, Electronic Engineering, kbko@ut.ac.kr, 정교수, 종신회원

논문번호 : 202001-021-C-RU, Received January 30, 2020; Revised March 6, 2020; Accepted March 6, 2020

## I. 서 론

최근 자율주행 자동차 산업의 눈부신 발전에 따라 자율주행 자동차의 안정성이 중요한 문제로 대두되고 있다<sup>1)</sup>. 이를 위해 자율주행 자동차가 수집한 다양한 데이터를 상호간 안정적으로 송·수신할 수 있는 차량간 통신 시스템이 각광을 받고 있으며, 대표적으로 IEEE 802.11p 기반의 WAVE (Wireless Access for Vehicle Environment) 통신 시스템이 고려되고 있다<sup>2,3)</sup>.

WAVE 통신 시스템에서 운전자가 필요로 하는 정보를 안정적으로 송수신하기 위해서는 고정밀 채널 추정이 반드시 필요하다. 기존 IEEE 802.11p의 물리계층에서 고려하는 채널 추정 기법은 각 프레임 별로 발생하는 프리앰블 (preamble) 내 긴 훈련신호 (long training symbols)를 이용하여 초기 채널 추정을 수행하고, 이후 이를 데이터 필드 내 모든 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 심볼에 적용한다<sup>4)</sup>. 그러나, 고속으로 운행하는 자율주행 자동차 환경에서는 채널의 시변 특성이 극심하기 때문에 채널 추정 성능이 급격히 열화되는 문제점을 가진다.

이러한 문제점을 극복하기 위해서 각 OFDM 심볼에서 검출되는 데이터 심볼을 파일럿으로 재구성하여 현재 OFDM 심볼이 겪는 채널값을 지속적으로 업데이트하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. J. A. Fernandez 등은 각 OFDM 심볼의 부반송파에서 검출된 데이터 심볼을 파일럿으로 구성한 후 이를 이용하여 현재 채널값을 추정하고, 시간축 및 주파수축에서 평균화 과정을 통해 최종 채널 추정값을 업데이트하는 STA (Spectral Temporal Averaging) 기법을 제안하였다<sup>5)</sup>. 평균화 과정을 통해 잡음에 의한 성능 열화를 완화시키고, 안정적인 PER (packet error rate) 및 BER (bit error rate) 성능을 보장해준다. 그러나, 채널의 시변 특성에 의한 오차를 극복하는 데에는 한계를 보이며, 차량의 이동속도가 빨라질수록 error floor가 발생하는 문제점을 가지고 있다.

반면 CDP (Constructed Data Pilots) 기법은 STA 기법과 동일하게 각 OFDM 심볼의 부반송파에서 겪는 채널을 추정한 후 평균화 과정 대신 이에 대한 신뢰도 테스트를 진행하여 신뢰도가 높은 채널값은 다음 OFDM 심볼의 데이터 검출에 이용하고, 신뢰도가 낮은 채널값은 이전 채널값을 그대로 사용하는 방식으로 제안되었다<sup>6)</sup>. CDP 기법은 채널 추정값의 신뢰도가 낮은 경우 이전 채널값을 재사용하기 때문에 신뢰도가 높은 채널 추정값들로만 업데이트를 진행하고,

이는 높은 SNR (signal to noise ratio) 영역에서 STA 기법 대비 높은 PER 성능을 보여준다. 그러나, 지속적으로 채널 신뢰도 값이 낮은 환경에서는 실시간으로 채널 추정값에 대한 업데이트를 진행할 수 없기 때문에 error propagation에 의한 성능 열화가 발생한다.

반면, TRFI (time domain reliable test frequency domain interpolation) 기법은 CDP 기법과 유사하게 각 OFDM 심볼의 부반송파와 별도 채널 추정한 후 신뢰도 테스트를 통해 추정된 채널값의 정확도를 판별하는 방식이다<sup>7)</sup>. CDP 기법과의 차이점은 신뢰도 테스트 이후 신뢰도가 낮은 채널 추정값은 동일 심볼 내 신뢰도가 높은 채널 추정값들을 기반으로 보간법을 통해 채널값을 최종적으로 업데이트한다. 이는 지속적으로 채널 신뢰도 값이 낮은 환경에서도 이전 채널을 가져오는 대신 현재 OFDM 심볼에서 보간법을 사용하므로 error propagation에 의한 성능 열화를 완화시킬 수 있고, PER 성능을 향상시킬 수 있다.

CDP 기법과 TRFI 기법은 공통적으로 디매핑 정보를 이용하여 신뢰도 테스트를 진행한다. 따라서, 디매핑 오차에 의한 채널 추정 정확도가 열화되는 문제점을 가지고 있다. 특히, 차량의 고속 이동 환경이나 NLOS (non line-of-sight) 채널 환경에서는 디매핑 오차 확률이 커져서 이에 따른 성능 열화가 심각하다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 TRFI 기법 기반의 새로운 신뢰도 테스트 방법 및 시간축 보간 기법을 이용한 채널 업데이트 방법을 제안한다. 제안 기법은 인접 OFDM 심볼 간 채널 상관값이 높다는 가정 하에 추정된 채널값과 이전 채널값의 상관값을 미리 정해진 임계값과 비교하여 신뢰도를 평가한다. 이는 디매핑 오차에 의한 성능 열화를 완화시킴으로써 채널 추정 성능을 향상시킬 수 있다. 뿐만 아니라, 신뢰도가 낮은 채널 값을 업데이트할 때 주파수축 보간 기법 뿐만 아니라 시간축에서 보간 기법을 수행한 후 이전 채널과 높은 상관값을 가지는 채널값으로 최종 업데이트하는 기법을 제안한다. 시간축 보간 기법을 추가로 사용함으로써 보간 기법 적용 시 신뢰도가 높은 채널 값의 수를 높일 수 있기 때문에 채널 추정 정확도 및 PER 성능을 향상할 수 있다.

## II. 시스템 모델

### 2.1 IEEE 802.11p 물리 계층

제안 기법은 기존 IEEE 802.11p WAVE 물리계층의 패킷 구조를 동일하게 고려한다. WAVE 시스템의 각 패킷은 프리앰블, 시그널 필드 그리고 데이터 필드

로 구성되고, 프리앰블은 다시 짧은 훈련 심볼과 긴 훈련 심볼로 구성된다. 짧은 훈련 심볼은 패킷 별 시간 동기화를 위해 사용되고, 긴 훈련 심볼은 초기 채널 추정을 위해 사용된다.

시그널 필드는 송신 신호의 변조 방식, 코드율 등의 정보를 포함하고 있으며, 데이터 필드는 실제 송신 데이터 정보로 구성되어 있다. 표준 문서에 따르면 데이터 필드를 구성하는 OFDM 심볼은 가변적으로 사용할 수 있으며 본 논문에서는 100개의 OFDM 심볼로 구성되어 있다고 가정한다.

표 1은 IEEE 802.11p 물리계층에서 사용하는 각 파라미터들의 값을 제시하고 있다. 송신단에서는 표 1에서 나타는 바와 같이 변조 기법과 코드율을 선택하여 무선 채널에 의한 오류 방지를 위해 길쌈부호화(convolutional encoding) 과정과 인터리빙 과정을 수행한다. 그리고, 64-point IFFT (inverse fast Fourier transform)를 통해 OFDM 변조를 수행하는 데 이 중 12개는 가상 부반송파로 데이터를 전송하지 않으며, 나머지 52개 중 4개는 파일럿, 48개는 실제 데이터를 전송하게 된다. 이후 보호 구간과 프리앰블을 차례로 삽입한 후 완성된 패킷을 송신하게 된다.

수신단에서는 수신 신호로부터 프리앰블과 시그널을 분리한 후 프리앰블 내 긴 훈련 심볼을 이용하여 초기 채널값을 추정한다. 이후 제안하는 채널 추정기법에 따라 데이터 필드에서 각 OFDM 심볼 별로 채널 추정값을 업데이트 및 송신 데이터를 복원하는 과정을 거치게 된다.

표 1. IEEE 802.11p 파라미터  
Table 1. Parameters in IEEE 802.11p

파라미터	값
대역폭	10 MHz
변조 기법	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
코드율	1/2, 2/3, 3/4
데이터 부반송파 수	48
파일럿 부반송파 수	4
파일럿 부반송파 인덱스 ( $\delta$ )	-21, -7, 7, 21
총 부반송파 수	64
FFT 길이	6.4 $\mu$ s
GI 길이	1.6 $\mu$ s
심볼 길이	8.0 $\mu$ s

## 2.2 WAVE 채널 모델

WAVE 통신 시스템의 채널 모델은 차량의 이동성에 의해 시간에 따라 변화하는 채널 특성을 가지며, 차량의 이동 속도가 빨라질수록 채널의 시변 특성이 급격하게 변화한다. WAVE 통신 시스템에서 무선 채널을 모델링하는 다양한 방법이 연구되고 있는데<sup>[8]</sup> 본 논문에서는 WAVE 차량 간 채널 모델로서 Cohda Wireless 사의 Malik Kahn이 제안한 Cohda Wireless 채널 모델을 고려한다<sup>[9]</sup>.

Cohda Wireless 채널 모델은 5.6-5.9 GHz 주파수 밴드에서 동작하는 WAVE 통신 시스템의 채널을 실측하여 모델링 하였는데, 표 2에 나타난 것처럼 차량의 주행 속도와 장소에 따라서 5가지 시나리오 (Rural LOS (line-of-sight), Urban Approaching, Crossing

표 2. 시나리오에 따른 채널 프로파일  
Table 2. Channel profile due to scenario

(a) Rural LOS (144 km/h)

	Tap1	Tap2	Tap3	Tap4	Units
Power	0	-14	-17	-	dB
Delay	0	83	183	-	ns
Doppler	0	492	-295	-	Hz

(b) Urban Approaching LOS (119 km/h)

	Tap1	Tap2	Tap3	Tap4	Units
Power	0	-8	-10	-15	dB
Delay	0	117	183	333	ns
Doppler	0	236	-157	492	Hz

(c) Crossing NLOS (126 km/h)

	Tap1	Tap2	Tap3	Tap4	Units
Power	0	-3	-5	-10	dB
Delay	0	267	400	533	ns
Doppler	0	295	-98	591	Hz

(d) Highway LOS (252 km/h)

	Tap1	Tap2	Tap3	Tap4	Units
Power	0	-10	-15	-20	dB
Delay	0	100	167	500	ns
Doppler	0	689	-492	886	Hz

(e) Highway NLOS (252 km/h)

	Tap1	Tap2	Tap3	Tap4	Units
Power	0	-2	-5	-7	dB
Delay	0	200	433	700	ns
Doppler	0	689	-492	886	Hz

NLOS, Highway LOS, Highway NLOS)로 분류하였고, 각각 시간지연 프로파일 (delay profile)과 도플러 프로파일 (Doppler profile) 값을 제시하였다.

### III. 제안하는 채널 추정 기법

대표적인 WAVE 통신 시스템의 채널 추정 기법 중 하나인 TRFI 기법은 이동속도가 낮고, LOS가 보장되는 채널 환경에서는 우수한 성능을 보이는 반면, 고속의 이동 환경 및 NLOS 환경에서는 채널 추정 성능이 열화되는 문제점을 가지고 있다. 본 장에서는 이러한 문제를 해결하고, PER 성능을 향상시킬 수 있는 새로운 채널 추정 기법을 제안한다.

#### 3.1 초기채널 추정 및 초기 데이터 파일럿 구성

제안 기법에서 초기채널 추정 및 초기 데이터 파일럿 구성 방법은 기존 TRFI 기법과 동일하게 수행된다. 시간 영역에서 수신된 긴 훈련 심볼  $T_1(n)$ 과  $T_2(n)$ 을 FFT 수행 후 주파수 영역에서  $k$ 번째 부반송파의 수신 심볼을 각각  $Y_1(k)$ ,  $Y_2(k)$ 라 하면 LS (least square) 기법을 이용하여 다음과 같이  $k$ 번째 부반송파의 초기 채널값  $H_0(k)$ 를 추정한다.

$$H_0(k) = \frac{Y_1(k) + Y_2(k)}{2X(k)} \quad (1)$$

이 때  $X(k)$ 는 송수단인이 사전에 약속한  $k$ 번째 부반송파의 훈련 신호를 의미한다.

이후 데이터 필드에서 수신된 첫 번째 수신 OFDM 심볼의  $k$ 번째 부반송파 심볼  $R_1(k)$ 를 다음과 같이 등화시킨다.

$$\hat{T}_1(k) = \frac{R_1(k)}{H_0(k)} \quad (2)$$

$\hat{T}_1(k)$ 는 첫 번째 수신 데이터의  $k$ 번째 부반송파 심볼을  $H_0(k)$ 로 등화시킨 심볼을 의미한다. 이후 다음과 같이 디매핑 과정을 통해 송신 데이터 심볼을 복원한다.

$$\hat{X}_1(k) = Q(\hat{T}_1(k)) \quad (3)$$

$Q(\cdot)$ 는 디매핑 과정을 의미하는 함수이고,  $\hat{X}_1(k)$ 는 첫 번째 송신 데이터의  $k$ 번째 부반송파에

실린 송신 데이터를 추정한 심볼을 나타낸다.

추정된 송신 데이터 심볼  $\hat{X}_1(k)$ 를 데이터 파일럿으로 구성하여 첫 번째 심볼의  $k$ 번째 부반송파 채널값을 다음과 같이 업데이트 한다.

$$\hat{H}_1(k) = \frac{R_1(k)}{\hat{X}_1(k)} \quad (4)$$

이후 추정된 채널값의 신뢰도 테스트를 수행한다. 두 인접 채널 간 상관값이 높다는 가정 하에 이전 수신된 긴 훈련 심볼  $Y_2(k)$ 를 다음과 같이  $H_0(k)$ 와  $\hat{H}_1(k)$ 로 각각 등화 및 디매핑하여  $\hat{X}'_1(k)$ 와  $\hat{X}''_1(k)$ 를 추정한다.

$$\hat{T}'_1(k) = \frac{Y_2(k)}{H_0(k)} \quad (5)$$

$$\hat{T}''_1(k) = \frac{Y_2(k)}{\hat{H}_1(k)} \quad (6)$$

$$\hat{X}'_1(k) = Q(\hat{T}'_1(k)) \quad (7)$$

$$\hat{X}''_1(k) = Q(\hat{T}''_1(k)) \quad (8)$$

두 인접 채널 간 상관값이 높다고 가정했으므로  $\hat{H}_1(k)$ 가 정확하게 추정되었다면  $\hat{H}_1(k)$ 와  $H_0(k)$ 는 거의 유사할 것이고, 이를 이용해 디매핑한  $\hat{X}'_1(k)$ 와  $\hat{X}''_1(k)$  또한 동일한 심볼이어야 한다. 따라서,  $\hat{X}'_1(k)$ 와  $\hat{X}''_1(k)$ 가 동일하다면  $\hat{H}_1(k)$ 는 높은 신뢰도로 정확히 추정되었다고 판단하고,  $\hat{X}'_1(k)$ 와  $\hat{X}''_1(k)$ 가 같지 않다면 추정된  $\hat{H}_1(k)$ 는 낮은 신뢰도로 정확하지 않다고 판단한다. 따라서, 이 경우에는 다음과 같이 현재 추정된 채널값  $\hat{H}_1(k)$ 를 제거하는 대신 인접한 신뢰성 높은 채널 추정값들을 이용하여 주파수 영역에서 보간법을 통해 채널 추정값을 업데이트한다.

$$H_1(k) = \begin{cases} \hat{H}_1(k), & \hat{X}'_1(k) = \hat{X}''_1(k) \\ interpolation, & \hat{X}'_1(k) \neq \hat{X}''_1(k) \end{cases} \quad (9)$$

### 3.2 데이터필드 내 채널 추정 - 상관값 기반 시간보간

이후 데이터 필드에서 수신된  $i$ 번째 수신 OFDM 심볼의  $k$ 번째 부반송파 심볼  $R_i(k)$  ( $2 \leq i \leq I$ )를 다음과 같이 등화시킨다.

$$\hat{T}_i(k) = \frac{R_i(k)}{H_{i-1}(k)} \quad (10)$$

$\hat{T}_i(k)$ 는  $i$ 번째 수신 데이터의  $k$ 번째 부반송파 심볼을  $H_{i-1}(k)$ 로 등화시킨 심볼을 의미한다. 이후 다음과 같이 디매핑 과정을 통해 송신 데이터 심볼을 복원한다.

$$\hat{X}_i(k) = Q(\hat{T}_i(k)) \quad (11)$$

$\hat{X}_i(k)$ 는  $i$ 번째 송신 데이터의  $k$ 번째 부반송파에 실린 송신 데이터를 추정된 심볼을 나타낸다.

추정된 송신 데이터 심볼  $\hat{X}_i(k)$ 를 데이터 파일럿으로 구성하여  $i$ 번째 심볼의  $k$ 번째 부반송파 채널값을 다음과 같이 업데이트 한다.

$$\hat{H}_i(k) = \frac{R_i(k)}{\hat{X}_i(k)} \quad (12)$$

이후 추정된 채널값의 신뢰도 테스트를 수행한다. 이 때, 첫 번째 추정 채널값에 대한 신뢰도 테스트와는 달리 제안 기법에서는 앞서 추정한 두 채널의 상관값을 이용하여 신뢰도 테스트를 진행한다. 두 인접 채널 간 상관값이 높다는 가정 하에  $\hat{H}_i(k)$ 와  $H_{i-1}(k)$  간 상관값을 계산하여 특정 임계값보다 크면 높은 신뢰도로 정확하게 추정되었다고 판단하고, 반대로 특정 임계값보다 작으면 낮은 신뢰도로 정확도가 낮다고 판단하여 해당 추정 채널 값을 제거한다. 이 때, 임계값은 52개의  $(i-2)$ 번째 채널과  $(i-1)$ 번째 채널 상관값 중 가장 작은 값으로 설정한다. 결과적으로 다음과 같이 신뢰도 테스트를 수행하여 해당 채널값을 업데이트한다.

$$H_i(k) = \begin{cases} \hat{H}_i(k), & \left| \frac{\hat{H}_i(k)H_{i-1}^*(k)}{\hat{H}_i(k)H_{i-1}^*(k)} \right| \geq \eta_{th} \\ 0, & \left| \frac{\hat{H}_i(k)H_{i-1}^*(k)}{\hat{H}_i(k)H_{i-1}^*(k)} \right| < \eta_{th} \end{cases} \quad (13)$$

$$\eta_{th} = \min\left(\left| \frac{H_{i-2}(k)H_{i-1}^*(k)}{H_{i-2}(k)H_{i-1}^*(k)} \right| \right), \forall k \quad (14)$$

다음 단계로 신뢰도 테스트를 통과하지 못하고 채널값이 업데이트되지 못한 경우 보간법을 통해서 채널 추정값을 업데이트한다. 이 때, 시간축과 주파수축에서 각각 보간법을 통해 채널을 추정한 후 최종적으로 이전 채널값과 상관값이 더 큰 추정 채널값으로 업데이트한다.

$$H_i(k) = \begin{cases} \hat{H}_{TLi}(k), & C_{TLi}(k) \geq C_{FLi}(k) \\ \hat{H}_{FLi}(k), & C_{TLi}(k) < C_{FLi}(k) \end{cases} \quad (15)$$

여기서,  $C_{TLi}(k)$ 는  $i$ 번째 심볼의  $k$ 번째 부반송파에서 시간축 보간 기법에 의해 추정한 채널  $\hat{H}_{TLi}(k)$ 와 이전 채널값  $H_{i-1}(k)$  간 상관값을 의미하고,  $C_{FLi}(k)$ 는  $i$ 번째 심볼의  $k$ 번째 부반송파에서 주파수축 보간 기법에 의해 추정한 채널  $\hat{H}_{FLi}(k)$ 와 이전 채널값  $H_{i-1}(k)$  간 상관값을 의미한다.

$$C_{TLi} = \left| \frac{\hat{H}_{TLi}(k)H_{i-1}^*(k)}{\hat{H}_{TLi}(k)H_{i-1}^*(k)} \right| \quad (16)$$

$$C_{FLi} = \left| \frac{\hat{H}_{FLi}(k)H_{i-1}^*(k)}{\hat{H}_{FLi}(k)H_{i-1}^*(k)} \right| \quad (17)$$

일반적으로 선형 보간법 대비 고차원 보간법이 채널 추정에 더 좋은 성능을 보여준다<sup>[10]</sup>. 본 논문에서는 최적의 보간 성능을 보장하기 위해 TRFI 기법과 마찬가지로 spline cubic 보간법을 적용하여 채널값을 업데이트한다<sup>[7]</sup>.

기존의 TRFI 기법과 제안 기법 간 가장 큰 차이점은 추정된 채널값의 신뢰도 테스트를 수행하는 부분에서 디매핑 정보 대신 이전 채널값과 추정된 채널값 간 상관값을 이용하는 것과 시간축 보간법을 추가로 이용하여 추정 채널값의 정확도를 향상시킬 수 있다는 것이다. 기존 TRFI 기법은 디매핑 정보를 이용하여 신뢰도 테스트를 수행하는 과정에서 디매핑 오차에 의한 성능 열화가 가장 큰 문제점이다. 반면, 제안 기법은 디매핑 정보 대신 현재 추정된 채널값과 이전 채널값 간 상관값을 이용하여 이전 채널과 유사도가 높은 추정 채널값을 신뢰도가 높은 추정값으로 판단하기 때문에 디매핑 오차에 의한 성능 열화를 완화시킬 수 있다.

뿐만 아니라, 제안 기법은 신뢰도 테스트를 통과하지 못한 채널값에 대해서 주파수축 보간법 뿐만 아니라 시간축 보간법을 통해 두 개의 채널값을 추정한 후 이전 채널값과의 상관값을 비교하여 더 높은 상관값

을 가지는 채널로 최종 업데이트한다. 일반적으로 보 간 기법은 신뢰도가 높은 데이터 수가 많을수록 추정 데이터의 정확도가 높아진다. 따라서,  $i$ 가 작을 경우에는 신뢰도가 높은 데이터 수가 많은 주파수축 보 간 기법에 의해 추정된 채널값이 최종 채널값으로 업데이트될 확률이 높다. 그러나,  $i$ 가 커질수록 시간축 보 간 기법을 사용하는 것이 신뢰도가 높은 데이터 수를 더 많이 보장해주기 때문에 시간축 보 간 기법에 의해 추정된 채널값이 최종 채널값으로 업데이트된다. 결과 적으로 제안 기법이 기존 TRFI 기법 대비 더 높은 PER 성능을 보여주게 된다.

#### IV. 모의 실험

본 모의실험에서는 Cohda Wireless 채널 모델 중 Crossing 및 Highway NLOS의 채널환경에서 기존 기법들과 제안기법의 BER 및 PER 성능과 MSE (mean square error)를 비교, 분석한다. 대역폭은 10 MHz, 변조방식은 QPSK, 코드는 1/2로 적용하였고, 한 프레임 패킷을 구성하는 데이터 필드는 OFDM 심볼 100개로 설정하였다.

제안 기법의 성능 평가를 위하여 채널 상관값의 비교 임계값  $\eta_{th}$ 는 (14)와 같이 52개의  $(i-2)$ 번째 채널과  $(i-1)$ 번째 채널 상관값 중 가장 작은 값으로 설정하였다.

그림 1과 2는 각각 교차로 NLOS 환경에서 기존 기법인 STA, CDP, TRFI와 제안 기법 간 PER과 BER 성능을 보여준다. 그림 1과 2 모두 낮은 SNR 영역에서는 STA 기법이 우수한 PER 및 BER 성능을

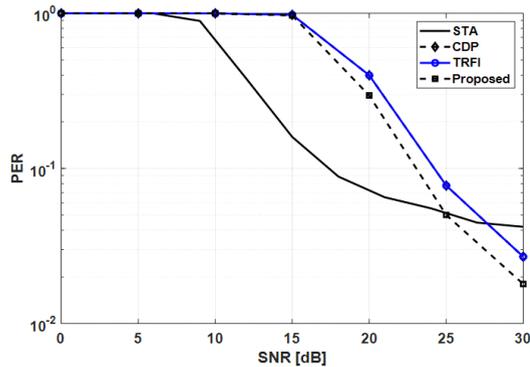


그림 1. Crossing NLOS (126 km/h) 환경에서 기존 기법들과 제안 기법 간 PER 성능 비교  
Fig. 1. PER Comparison between Conventional and the proposed channel estimation schemes in Crossing NLOS (126 km/h).

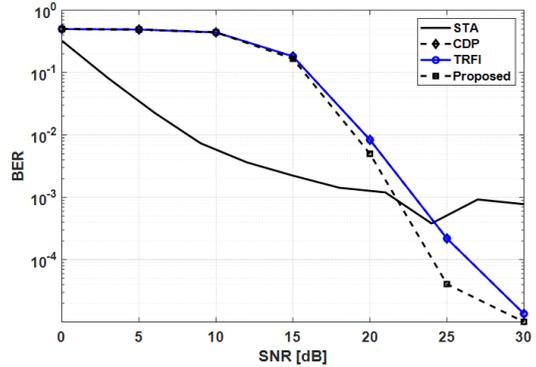


그림 2. Crossing NLOS (126 km/h) 환경에서 기존 기법들과 제안 기법 간 BER 성능 비교  
Fig. 2. BER Comparison between Conventional and the proposed channel estimation schemes in Crossing NLOS (126 km/h).

보여준다. STA 기법은 시간축 및 주파수축에서 추정된 채널값의 평균화 과정을 통해서 잡음에 의한 성능 열화를 완화시켜 주기 때문이다. 그러나, NLOS의 채널 특성 상 평균화 과정으로는 채널 추정 오차를 완화시키는 데 한계가 있으며 이로 인해 높은 SNR 영역에서는 error floor가 발생하게 된다. 반면, 높은 SNR 영역에서는 제안 기법이 가장 우수한 PER 및 BER 성능을 보여준다. 이는 CDP 및 TRFI에서 수행한 신뢰도 테스트와 달리 추정된 채널의 상관값을 기반으로 주파수축 보간과 시간축 보간 중 더 정확도가 높은 채널값으로 업데이트를 함으로써 디매핑 오차를 완화시키고, 채널 추정 정확도를 더욱 향상시킬 수 있기 때문이다. CDP와 TRFI의 경우 Crossing NLOS에서 동일한 성능을 보여주는데 이는 NLOS 환경에서는 주파수축에서 보간법을 적용하는 방식 (TRFI)과 이전 채널값을 그대로 가져다 사용하는 방식 (CDP) 간 성능 차이가 없기 때문이다.

그림 3과 4는 각각 Highway NLOS 환경에서 기존 기법인 STA, CDP, TRFI와 제안 기법 간 PER과 BER 성능을 보여준다. Highway NLOS 환경에서 고려되는 상대속도는 252 km/h로 교차로 대비 고속 이동 환경이므로 채널의 시변 특성이 극심해진다. 이로 인해 전반적인 PER 및 BER 성능은 그림 1과 2 대비 열화되는 것을 확인할 수 있다. 특히, STA 기법의 경우 평균화 과정만으로 채널의 시변 특성에 의한 오차를 완화하는 것은 불가능하며, 이로 인해 빠른 시점에 error floor가 발생하게 된다. 반면, 상관값 기반의 새로운 신뢰도 테스트를 수행하는 제안 기법은 CDP 및 TRFI 대비 PER과 BER 관점에서 모두 우수한 성능을 보여주고 있다. 따라서, 제안 기법은 고속 이동 환

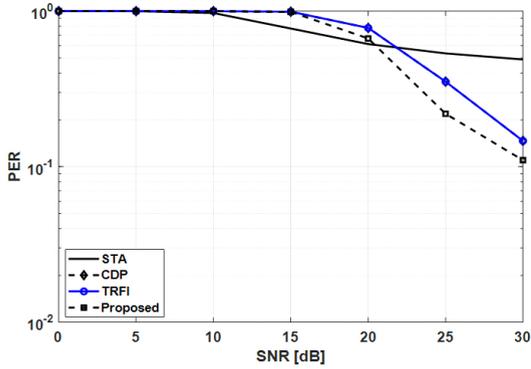


그림 3. Highway NLOS (252 km/h) 환경에서 기존 기법들과 제안 기법 간 PER 성능 비교  
Fig. 3. PER Comparison between Conventional and the proposed channel estimation schemes in Highway NLOS (252 km/h).

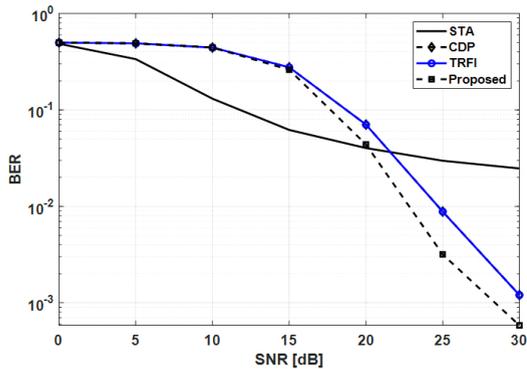


그림 4. Highway NLOS (252 km/h) 환경에서 기존 기법들과 제안 기법 간 BER 성능 비교  
Fig. 4. BER Comparison between Conventional and the proposed channel estimation schemes in Highway NLOS (252 km/h).

경 및 NLOS 환경에서 기존 기법들보다 우수한 PER 및 BER 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. CDP와 TRFI의 경우 Highway NLOS에서 동일한 성능을 보여주는데 이는 NLOS 환경에서는 주파수축에서 보간법을 적용하는 방식 (TRFI)과 이전 채널값을 그대로 가져다 사용하는 방식 (CDP) 간 성능 차이가 없기 때문이다.

그림 5와 6은 각각 Crossing NLOS 환경과 Highway NLOS 채널 환경에서 제안 기법과 기존 기법들 간의 normalized MSE 성능을 보여준다. 두 환경 모두 높은 SNR로 갈수록 제안 기법이 기존 기법 대비 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. SNR이 낮은 경우 STA 기법의 MSE 성능이 가장 우수하지만 높은 SNR에서 error floor가 발생하는 것을 알 수 있으며 이는 앞서 설명한 것과 같이 평균화 과

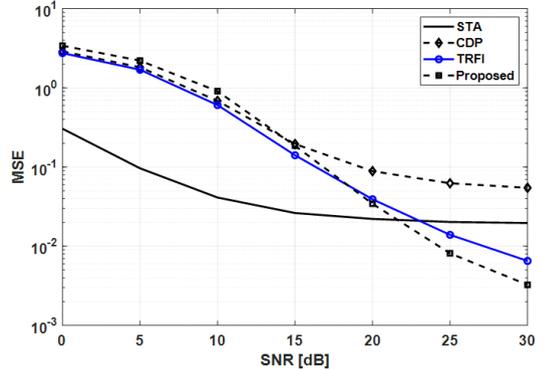


그림 5. Crossing NLOS (126 km/h) 환경에서 기존 기법들과 제안 기법 간 normalized MSE 성능 비교  
Fig. 5. Normalized MSE Comparison between Conventional and the proposed channel estimation schemes in Crossing NLOS (126 km/h).

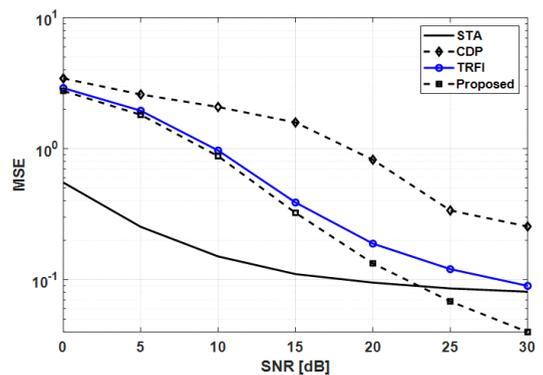


그림 6. Highway NLOS (252 km/h) 환경에서 기존 기법들과 제안 기법 간 normalized MSE 성능 비교  
Fig. 6. Normalized MSE Comparison between Conventional and the proposed channel estimation schemes in Highway NLOS (252 km/h).

정의 한계 때문이다. 반면, 상관값 및 시간-주파수 간 선택적 보간 방법을 사용하는 제안 기법은 높은 SNR로 갈수록 디매핑 오차를 감소시키기 때문에 채널 추정 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.11p WAVE 통신 시스템에서 고속 이동의 NLOS 채널 환경에서 기존 채널 추정 기법인 TRFI 기법의 문제점을 분석하였고, 이러한 문제점을 극복할 수 있는 새로운 채널 추정 기법을 제안하였다. 제안 기법은 추정된 채널값의 신뢰도를 테스트하는 과정에서 디매핑 정보를 이용하지 않고, 이전 채널값과의 상관값을 측정하여 신뢰도를 판단한다. 또한, 신뢰도가 낮은 채널값을 업데이트할 때 주파수

측 보간 기법뿐만 아니라 시간측 보간 기법을 통해 채널값을 추정한 후 이전 채널과 상관값이 더 높은 채널값으로 최종 업데이트 한다. 이는 기존 신뢰도 테스트 대비 디매핑 오차를 완화시킬 수 있을 뿐만 아니라 보간 기법 적용 시 더 많은 수의 신뢰도 높은 데이터 확보를 가능하게 하여 채널 추정 정확도 및 PER과 BER 성능을 향상시킬 수 있다.

### References

[1] K. Zheng, Q. Zheng, H. Yang, L. Zhao, L. Hou and P. Chatzimisios, "Reliable and efficient autonomous driving: The need for heterogeneous vehicular networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 12, Dec. 2015.

[2] A. Ghosh, V. V. Paranthaman, G. Mapp, O. Gemikonakli, and J. Loo, "Enabling seamless V2I communications: Toward developing cooperative automotive applications in VANET systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 12, Dec. 2015.

[3] IEEE 802.11p, *IEEE Standard for Information Technology - Telecommunication and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements. part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications - Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments*, <http://www.ieee802.org/11/>, 2010.

[4] C. Lin, C. Sun, J. Lin, and B. Chen, "Performance evaluations of channel estimations in IEEE 802.11p environments," in *Proc. Int. Conf. ICUMT Ultra Modern Telecommun. Wkshps.*, pp. 1-5, 2009.

[5] J. A. Fernandez, K. Borries, L. Cheng, B. V. K. Vijaya Kumar, D. D. Stancil, and F. Bai, "Performance of the 802.11p physical layer in vehicle-to-vehicle environments," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 61, no. 1, pp. 3-14, Jan. 2012.

[6] Z. Zhao, X. Cheng, M. Wen, B. Jiao, and C-X. Wang, "Channel estimation schemes for IEEE 802.11p standard," *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 5, no. 4, Oct. 2013.

[7] Y. K. Kim, J. M. Oh, Y. H. Shin, and C. Mun, "Time and frequency domain channel estimation

scheme for IEEE 802.11p," in *Proc. IEEE ITSC*, Oct. 2014.

[8] J. M. Oh and C. Mun, "Analysis and modeling of IEEE 802.11p wireless channel characteristics in domestic channel characteristics in domestic radio propagation," *J. Korean Inst. Inf. Technol.*, vol. 14, no. 2, pp. 45-51, Feb. 2016.

[9] M. Kahn, "*IEEE 802.11 Regulatory SC DSRC Coexistence Tiger Team - V2V Radio Channel Models*," Feb. 2014.

[10] M. Hsieh and C. Wei, "Channel estimation for OFDM systems based on comb-type pilot arrangement in frequency selective fading channels," *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 44, no. 1, Feb. 1998.

### 임 성 목 (Sungmook Lim)



2005년 2월 : 연세대학교 전기  
전자공학부 졸업  
2012년 8월 : 연세대학교 전기  
전자공학부 박사  
2012년 9월~2014년 3월 : 연세  
대학교 박사 후 연구원 재직  
2014년 4월~현재 : 한국교통대  
학교 전자공학과 교수

<관심분야> 무선통신, 차량 간 통신, 신호처리

[ORCID:0000-0002-6850-4403]

### 고 균 병 (Kyunbyoung Ko)



1997년 2월 : 연세대학교 전기  
전자공학부 졸업  
1999년 2월 : 연세대학교 전기  
전자공학부 석사  
2004년 2월 : 연세대학교 전기  
전자공학부 박사  
2004년 3월~2007년 2월 : 삼성  
전자 책임연구원 재직

2007년 3월~현재 : 한국교통대학교 전자공학과 교수

<관심분야> 무선통신, ITS, Cooperative relaying

[ORCID:0000-0002-0192-0269]